

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXVII. SZEMINÁRIUMA

2011/7-8.

I. Kötet

88 oldal
LXII. évfolyam

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriuma

Gépipari Tudományos Egyesület Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztálya

MTA Miskolci Akadémiai Bizottsága

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék

MTA Miskolci Akadémiai Bizottságának Székháza (Miskolc, Erzsébet tér 3.)

2011. november 10. (csütörtök) – 11. (péntek)

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK

XXVII. SZEMINÁRIUMA

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék

H-3515 Miskolc-Egyetemváros

Telefon/fax: (0036)-46-327 643

e-mail: machpj@uni-miskolc.hu

A SZEMINÁRIUM SZERVEZŐI

Dr. KAMONDI LÁSZLÓ tanszékvezető egyetemi docens

Dr. habil. DÖBRÖCZÖNI ÁDÁM egyetemi tanár

Dr. PÉTER JÓZSEF egyetemi docens, a szeminárium titkára

Dr. SIPOSS ISTVÁN egyetemi docens

NÉMETH GÉZA egyetemi adjunktus

GERE ARANKA gazdasági ügyintéző

PETRÓNÉ TÓTH ILDIKÓ igazgatási ügyintéző

KORÁBBI RENDEZVÉNYEINK

Vezető konstruktőrök tanácskozása

Miskolc, 1973. augusztus 23-24.

Vezető konstruktőrök tanácskozása

Miskolc, 1975. július 23-24.

Géptervezők III. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1977. aug. 30-szeptember 1.

Géptervezők IV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1980. augusztus 26-27.

Géptervezők V. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1982. augusztus 25-26.

Géptervezők VI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1985. április 11-12

Géptervezők VII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1989. május 29-31.

Géptervezők VIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1991. május 29-30.

Géptervezők IX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1993. szeptember 30 – október 1.

Géptervezés '94 (Géptervezők X. Országos Szemináriuma)

Miskolc 1994. május 20.

Géptervezők XI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1995. május 29-30.

Géptervezés-termékfejlesztés '96 (Géptervezők és Termékfejlesztők XII. Országos Szemináriuma)

Miskolc, 1996. május 24-25.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1997. november 28.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1998. december 15.

Géptervezők és Termékfejlesztők XV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1999. szeptember 30-október 1.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2000. november 15-16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2001. november 8-9.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2002. november 7-8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2003. november 7-8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2004. november 11-12.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2005. november 10-11.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXII. Országos Szemináriuma

2006. november 9-10.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIII. Országos Szemináriuma

2007. november 15-16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIV. Országos Szemináriuma

2008. november 6-7.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXV. Országos Szemináriuma

2009. november 5-6.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVI. Szemináriuma

2010. november 10-11.

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXVII. SZEMINÁRIUMA

Miskolc, 2011. november 10-11.

PLENÁRIS ÜLÉS. I. emelet, Nagyterem

2011. november 10. (csütörtök), délelőtt

Elnök: Dr. Kamondi László tanszékvezető egyetemi docens, PhD.

- 10.00-10.05** Dr. Kamondi László tanszékvezető egyetemi docens, PhD., Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Megnyitó
- 10.05-10.30** Dr. Goda Tibor egyetemi docens, PhD., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezési Tanszék: A diszkrét elem módszer mérnöki alkalmazásáról
- 10.30-10.55** Dr. Jármái Károly egyetemi tanár DSc., Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék, Oláh Róbert okl. gépészmérnök, tudományos munkatárs, ADMATIS Kft.: Hegesztett szerkezetek analízise és

optimalása hőfáradási szempont figyelembevételével

- 10.55-11.20** Dr. habil. Döbröczöni Ádám egyetemi tanár, CsC., Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Dr. Magyar József egyetemi tanár szakmai és közéleti tevékenysége miskolci szemmel
- 11.20-11.45** Dr. habil. Kundrák János tanszékvezető egyetemi tanár, DSc., Dr. Gyáni Károly, ny. egyetemi docens, Dr. Deszpoth István, mérnök tanár, Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszék: Keményfelületek befejező megmunkálási eljárásainak összehasonlító vizsgálata az anyagleválasztási teljesítmény alapján
- 11.45-12.00** Dr. Péter József egyetemi docens, CsC., Németh Géza egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Fogaskerék-hullámhajtómű laboratóriumi vizsgálata
- 12.00-14.00** Szünet

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám
elnök

Vesza József
főszerkesztő

Dr. Jármay Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Péter József

KEDVES OLVASÓ!

A Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriumára jelentkezők száma több, mint az előző években megszokott volt, a publikálni szánt cikkek tématerülete pedig egyre gazdagabb. A hagyományosnak tekintett gépszerkesztési példák mellett egyre több az egészségügyi, orvosi eszközökkel, termékekkel foglalkozó cikk, szélesedik a beszállítói ipar termék-palettája is. Mindezek arra engednek következtetni, hogy a gépészmérnökök feladatai – karöltve a villamosmérnökökkel, informatikusokkal, anyagtudósokkal, orvosokkal és biológusokkal – sokasodnak, folyamatosan megújulnak, megtalálják az utat az autópárházhoz és a közlekedéshez, csakúgy, mint a mezőgazdaság, a környezetvédelem, az energiatermelés kisebb-nagyobb termelő és felhasználó egységeihez.

Ez azt is jelenti, hogy a mérnökök elhelyezkedése könnyebb és sikeresebb, ugyanakkor a munkavállalás, a mérnöki munka értékének elismertetése, nem ritkán a pénzbeli érték behajtása új feladatokat jelent. A gyorsan változó gazdasági és jogi-pénzügyi szabályozási környezet a vállalkozó mérnökök új, erőszakosabb piaci magatartását követeli meg.

Ezzel párhuzamosan a műszaki felsőoktatásban is javulnak a jelentkezők magukkal hozott ismeretei és nagyobb követelmények támaszthatók. Sokasodnak a mester szakokon tanulók és ha nagyon lassan is, de szaporodnak a doktori képzésben résztvevő mérnökök is, függetlenül attól, hogy a nyelveket beszélő, tehetséges mérnökpalántákra mind itthon, mind külföldön is „vadásznak”.

A mérnökképző egyetemeken a generációváltás lassan a végéhez ér, már felnőtt az a fiatal-középkorú oktatógárda, akik rövidesen átvesszik a „megharcolt” elődök feladatait. Ugyanakkor ez elődökre mindig tisztelettel tekintünk, mint akik a nem kevésbé változatos XX. század második felében mindannyiunkat tanítottak, akár egyetemi oktatóként, akár praktizáló mérnökként.

A nagy elődök egyike a nemrég elhunyt Dr. Magyar József tanszékvezető egyetemi tanár, akinek érdemeiről most, a Szemináriumon is megemlékezünk. 2012 januárjában pedig kiállítást szervezünk a tíz éve eltávozott Dr. Terplán Zénó professzor emlékére.

Mert professzoraink, oktatóink, a magyar műszaki egyetemeken aranyoklevelet szerzett mérnökeink emlékének megőrzése külön erőt adhat az utódok seregének.

Dr. Döbröczöni Ádám

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: +36-46/379-530, +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: hirlapelofizetes@posta.hu, faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343

ISSN 0016-8572

TARTALOM

1. Aczél Á.; Bojtár G.; Fehér L.; Keresztes D.: Versenyautó alváz térbeli rúdmodelljének végelelemes analízise	3	11. Élő G.: Innovatív problémamegoldási modell szuperszámítógépes szimulációval az INFCARE8 projekt példáján bemutatva	49
2. Antal D.; Szabó T.; Szilágyi A.: Ejtési teszt modellezése a tervezés fázisában	9	12. Handki A.; Tolvaj B.: Kísérleti stirling hűtő tervezése	52
3. Barcsák Cs.; Dr. Jármái K.: PSO algoritmus bővítése optimáláshoz, véges differencia alapú gradiens becsléssel	13	13. Horváth P.; Törőcsik D.: Magnetorheológ tengelykapcsoló optimalizálási lehetőségei	56
4. Bihari Z.; Dr. Sente J.: Külső csillagkereskes Görgős szabadonfutók egy tengelyűségének vizsgálata	17	14. Illés B.; Németh J.: Automatizált daru teherlengése csillapításának egy lehetséges módja	60
5. Bihari J.; Kamondi L.: Kis méretű műanyag fogaskerek vizsgálat	21	15. Jakab E.; Lénárt J.: CNC lemezmegmunkáló gépek	68
6. Czifra Á.: Műszaki felületek fraktál alapú vizsgálata	25	16. Jármái K.; Oláh R.: Hegesztett szerkezetek analízise és optimalása hőfáradási szempont figyelembevételével	72
7. Daróczy L.; Dr. Jármái K.: Új eljárás rácsos tartók topológiai optimalására	29	17. Kota L.; Jármái K.: Műszaki felügyeleti és karbantartó rendszerek optimalása	75
8. Drágár Zs.; Dr. Kamondi L.: Nem szabványos alapprofílu fogaskerek tervezésének kérdései	35	18. Kovács B.; Nándoriné Tóth M.: Robotok inverz feladatának megoldása	79
9. Ecsedi I., Baksa A.: Anizotróp anyagú prizmatikus rudak Saint-Venant csavarási feladata	39	19. Kovács Gy.; Jármái K.: Kompozit szendvicsszerkezet optimális tervezése rugalmas tolerancia módszerrel	83
10. Égert J.; Aczél Á.; Fehér L.; Körmendy Á.: Versenyautó alváz mechanikai modellezési lehetőségei és kritikus terhelései	43		

ÚJ ELJÁRÁS RÁCSOS TARTÓK TOPOLOGIAI OPTIMÁLÁSÁRA

NEW METHOD FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES

Daróczy László*, dr. Jármái Károly**

ABSTRACT

On the field of topology optimization two of the most well-known methods are the ESO/BESO method working with discrete values [1], [2], and the SIMP working with intermediate values, [5], [6]. This article will present a new evolutionary method based on fluid-like behavior. It will be shown mathematically that this method is the generalization of ESO/BESO method. The article will present the basic idea, the optimization algorithm, and finally compare the result of a cantilever-optimization with the result of the previous methods..

1. BEVEZETÉS

Az alábbiakban a jól ismert, klasszikus optimálási problémán - a külső potenciális energia („compliance”) minimálásán - keresztül kerül ismertetésre az új módszer, ahol az alábbi módon fogalmazható meg a probléma:

$$C(x) = \frac{1}{2} f^T u \rightarrow \min, \quad (1)$$

úgy, hogy:

$$\sum_{i=1}^N V_i x_i - V_0 f = 0, \quad (2)$$

$$Ku = f, \quad (3)$$

$$0 \leq x_{\min} \leq x_i \leq 1, \quad (4)$$

ahol K a globális merevségi mátrix, f a szerkezet globális terhelési vektora, u az elmozdulás-vektor, $C(x)$ a külső potenciális energia, N az elemek száma, x_i az i . elem sűrűsége, x_{\min} az elemek minimális sűrűsége, V_i az i . elem térfogata, V_0 a teljes tervezési tartomány térfogata, és f az elérni kívánt térfogatszázalék.

Az egyes elemek merevségi mátrixának számítása során felhasználjuk a SIMP (szilárd izotróp anyag

bűntetéssel) interpolációs sémát, ahol az egyes elemek Young-féle rugalmassági modulusát az alábbi összefüggés szerint bűntetjük, [4]:

$$E(x_i) = E_0 x_i^p, \quad (5)$$

ahol E_0 a tömör anyag rugalmassági modulusa, míg p a bűntetőparaméter. Ezek alapján definiálható (egyen-térfogató véges elemekből álló háló esetén) az egyes elemek érzékenysége, mely a célfüggvény optimalizált változók szerinti deriváltjaként fejezhető ki, a BESO megfogalmazásnál alkalmazott formát tekintve, [3]:

$$\alpha_i = \frac{x_{\min}^{p-1}}{2} u_i^T K_i^0 u_i, \quad (6)$$

amely leegyszerűsítve nem mást jelent, mint a teljes szerkezet „compliance” növekedését egyetlen (teljesen) tömör cella törlése esetén.

Amennyiben minimalizálni szeretnénk az alakváltozási energiát, akkor a legmagasabb érzékenységű elemeket kell megtartanunk (mert ezek törlése jelentősen növelné azt). A továbbiakban – véges elemes megfontolásokat követve – továbbra is az egyen-térfogató véges elemeket tartalmazó modellen kerül ismertetésre a megoldás, de az algoritmus jól alkalmazható tetszőleges háló esetén is, csupán – a BESO és SIMP módszerhez hasonlóan – ki kell egészíteni a (6) egyenletet az elemek térfogatával.

2. KVÁZI-STATIKUS KVÁZI FOLYADÉK ALAPÚ OPTIMÁLÁS

Az optimálás alapötlete az, hogy a folyadékok a stabil egyensúly állapotára törekednek, azaz igyekeznek a magasabb potenciális energiájú helyekről az alacsonyabbak felé áramlani, általában véve pedig kiegyenlíteni az energia-eloszlást. Amennyiben egy skalár mezőt akarunk minimálni, akkor a potenciális energiát egyszerűen a skalár mező értékére kell felvinnünk, így a folyadék át fog áramlani a skalármező magasabb értékű területeiről az alacsonyabb értékű területek felé.

Az alábbi definíciók segítségével írhatjuk fel a kvázi-folyadék viselkedését:

* gépészmérnök MSc hallgató, Miskolci Egyetem

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

A szilárd test sűrűsége (optimált változó):

$$\rho_s = x. \quad (7)$$

A folyadék-közeg sűrűsége az optimálási lépés elején:

$$\rho_f = \rho_s = x, \quad (8)$$

így teljesülnie kell, hogy:

$$\rho_f \in [0, 1]. \quad (9)$$

Mivel a folyadék képes egyetlen lépésben nagyon nagy változásokat is indukálni – ami kerülendő a megfelelően sima átmenetek érdekében – ezért az optimálási lépés végén bevezetünk egy sűrűség-tompítási sémát, ahol

$$x = \rho_s^{\text{new}} = H_D \rho_s^{\text{old}} + (1 - H_D) \rho_f, \quad (10)$$

ahol az új sűrűség megegyezik a régi és új számított sűrűség súlyozott átlagával, ahol H_D a sűrűség-tompítási tényező.

Megjegyzés: Bár azzal, hogy átlagoljuk az új megoldást – ami teljesít egy előírt térfogathányadot – egy korábbi – eltérő előírást teljesítővel – megoldással, látszólag hibát követünk el, azonban ez nem más, mint a térfogatszázalékra vonatkozó előírás betartatásának lassítása. $f=0,1$ -es előírt térfogathányad esetén is 20 iteráció esetén már nem fog különbséget eredményezni az algoritmus 2 000 000 véges-elem esetén sem. Bár a javasolt tompítási séma előnyös a konvergencia finomítására, de az algoritmus alkalmazásának nem elengedhetetlen feltétele.

A kvázistatikus elnevezés onnan ered, hogy bár egyértelmű megfeleltetést hoztunk létre a folyadék és a szerkezet szilárd anyagának sűrűsége között, ennek ellenére az optimálási lépés során feltételezzük, hogy a közeg sűrűségének változásának hatására a szerkezetben ébredő feszültségek változatlanok maradnak. Bár ez a megközelítés megkérdőjelezhető – és egy teljes, nem-statisztikus szimuláció alkalmazásának lehetősége továbbra is a kutatás céljai között szerepel – de a feltételezés révén jelentősen csökkenthető a szükséges számítások mennyisége.

Szerkezeti nyomás: A szerkezeti feszültségekből származó „nyomás” (nem azonos a szerkezetben ébredő feszültséggel). A célfüggvény értékével egyezik meg:

$$p_s = \alpha. \quad (11)$$

Szerkezetből származó potenciális mező – $U(p_s)$: A szerkezeti nyomásból eredő, folyadéokra is ható potenciális mező értéke. Ez a függvénykapcsolat határozza meg, hogy minimálunk vagy maximálunk.

$$U = U(p_s = \alpha). \quad (12)$$

Kvázi-folyadék állapotegyenlete – $p_f(\rho_f)$: A folyadék nyomása és sűrűsége közötti kapcsolatot meghatározó függvény. A teljesen üres tartományok elkerülése érdekében meghatározott értékek közé kell esnie (x_{\min} és 1). Nem lehet negatív sem.

Egyensúlyi állapotot leíró egyenlet: A folyadék egyensúlyi állapotát leíró egyenlet. A kvázi-folyadék elnevezés onnan származik, hogy ez az összefüggés

nem igaz valós folyadékokra, de hasonlít az összenyomhatatlan közeg leíró egyenletre. Az egyenlet azt fejezi ki, hogy a folyadék nyomásából és a potenciális térből származó energia összege állandó (ld. 1. ábra).

$$\rho_f(p_f) + U(p_s) = \text{const.} \quad (13)$$

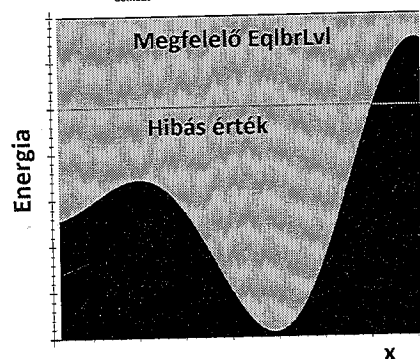
Mivel fenti képletben szereplő const. egy fontos paraméter lesz a továbbiakban, ezért a továbbiakban EqlbrLvl-ként fog szerepelni. Az előbbi egyenletet átrendezve

$$\rho_f = \rho_f^{-1}(\text{EqlbrLvl} - U(p_s = \alpha)), \quad (14)$$

ahol ρ_f^{-1} az anyagtörvény. Így látható, hogy – a már korábban említett paraméter értéke mellett – a függvény csak az érzékenységtől függ, és egyetlen egyenlettel kifejezhető a függvénykapcsolat. Bár elsőre nem állapítható meg a fenti formából, de az optimálás legfontosabb lépése innentől nem a sűrűségek számítása lesz, hanem EqlbrLvl értékének megfelelő megválasztása úgy, hogy teljesítse a

(2)-ben megfogalmazott korlátot (ld. 1. ábra):

$$\int_{V_{\text{domain}}} \rho_f(\alpha) dV = V_0 \cdot f. \quad (15)$$



1. ábra. Megfelelő és hibás EqlbrLvl

Annak érdekében, hogy (4) korlát is teljesüljön, a nyomást egy módosított alakban vesszük fel:

$$\rho_f = x_{\min} + (1 - x_{\min}) \cdot \rho_f^s(\alpha), \quad (16)$$

ahol ρ_f^s a skálázott anyagtörvény, mely teljesíti, hogy

$$(F1) \quad 0 \leq \rho_f^s(\alpha) \leq 1, \quad (17)$$

bármely lehetséges α esetre egy adott optimálási lépésben.

Tovább egyszerűsítve az összefüggést bevezetjük a dimenziótalanított érzékenységet:

$$\alpha = \frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}, \quad (18)$$

ahol α_{\min} és α_{\max} rendre a legkisebb és legnagyobb előforduló érzékenység egy optimálási lépésben, azaz

$$\rho_f = x_{\min} + (1 - x_{\min}) \cdot \rho_f^s\left(\frac{\alpha}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}\right), \quad (19)$$

Látható, hogy a (19) szerinti formában a skálázott dimenziótalan anyagtörvény értékészlete és értelmezési tartománya is a $[0, 1]$ tartomány. Az ilyen

jellegű függvényeket a matematikában több területen fuzzy-függvényeknek nevezik. Az alábbiakban itt is ezt a jelölést fogjuk használni, mivel ez a függvény mutatja meg – fuzzy logikával –, hogy egy elem mennyire tömör.

3. MEGFELELŐ FÜGGVÉNYSEREG VÁLASZTÁSA

Annak érdekében, hogy a paraméteres függvénysereg jól kezelhető legyen, bevezetjük a POSS (Possible Optimization Fuzzy Functions), azaz a Lehetséges Optimálási Fuzzy Függvények halmazát, ami a korábbi EqlbrLvl helyett egy threshold (ami speciális esetben ugyanazt a célt fogja szolgálni, mint a BESO módszer hasonló elnevezésű paramétere) nevű paraméter függvény lesz. A függvénysereg az alábbi módon jelölhető:

$$\ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}), \quad (20)$$

Annak érdekében, hogy a megoldás mindig egyértelmű maradjon, ennek a függvényseregnek teljesítenie kell a következő feltételt:

$$(F2) \int_{V_{\text{domain}}} \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}_1) dV = \int_{V_{\text{domain}}} \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}_2) dV = V_0 \cdot f, \quad (21)$$

if and only if $\text{threshold}_1 = \text{threshold}_2$ and $0 < \text{threshold}_2 < 1$

Emellett optimálási megfontolások alapján teljesülnie kell az alábbi feltételeknek is:

$$(F3) \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}=0) = 0, \quad (22)$$

$$(F4) \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}=1) = 1, \quad (23)$$

$$(F5) 0 \leq \frac{d\ddot{p}_f^s}{d\bar{\alpha}}(\bar{\alpha}=0) \leq 1, \quad (24)$$

$$(F6) 0 \leq \frac{d\ddot{p}_f^s}{d\bar{\alpha}}(\bar{\alpha}=1) \leq 1, \quad (25)$$

$$(F7) \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}_1) > \ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}_2) \text{ if and only if } \bar{\alpha}_1 > \bar{\alpha}_2, \quad (26)$$

Végül annak érdekében, hogy megfelelően szabályozható legyen az eljárás, bevezetésre kerül a CPOFF (Controllable Possible Optimization Fuzzy Functions), azaz a Vezérelhető Lehetséges Optimálási Fuzzy Függvények halmaza, mely kiegészül a threshold mellett egy további β paraméterrel, mely a függvény meredekségét fogja meghatározni threshold környezetében. A CPOFF függvényseregnek a korábban megfogalmazott (F1), (F2), (F3), (F4), (F5), (F6), (F7) feltételek mellett teljesítenie kell

$$(F8) \frac{d\ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}_1, \beta_1)}{d\bar{\alpha}} > \frac{d\ddot{p}_f^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}_1, \beta_2)}{d\bar{\alpha}}, \quad (27)$$

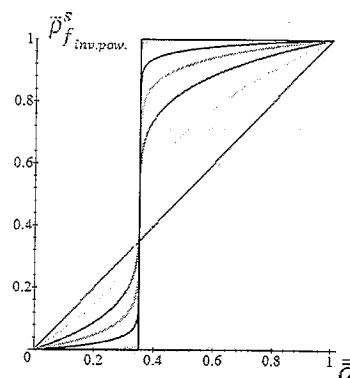
if and only if $\beta_1 > \beta_2$

a megoldás egyértelműségének érdekében.

4. JAVASOLT CPOFF FÜGGVÉNYEK

A korábban megfogalmazott (F1-8) feltételek mellett további alfeltételeket is meghatározhatunk, amelynek segítségével különböző tulajdonságú, más-más célra alkalmas függvényhalmazokat származtathatunk. Egy javasolt CPOFF függvény - az extra matematikai feltételek ismertetése nélkül - a 2. ábrán látható különböző β értékekre.

A későbbi mintapéldáknál a 2. ábrán szemléltetett inv.pow. rövidítéssel jelölt CPOFF függvény, a lineáris szakaszokból összetevődő pcw.lin., illetve a csak 0 és 1 diszkrét értékkészletű dis. CPOFF függvények kerülnek alkalmazásra.



2. ábra. Javasolt CPOFF függvény (inv.pow.)
threshold=0,35; $\beta=1, 2, 4, 8, 20, 200, 10000$

A teljesség igénye nélkül belátható, hogy

$$\begin{aligned} \lim_{\beta \rightarrow \infty} \left(\ddot{p}_{f, \text{inv. pow.}}^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}, \beta) \right) &= \\ &= \lim_{\beta \rightarrow \infty} \left(\ddot{p}_{f, \text{pcw. lin.}}^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}, \beta) \right) = \\ &= \ddot{p}_{f, \text{dis.}}^s(\bar{\alpha}, \text{threshold}) \end{aligned} \quad (28)$$

Azaz az új modell határesetben a diszkrét értékekkel dolgozó BESO eljárást adja vissza, így a BESO eljárás az új eljárás egy határesetének tekinthető.

5. AZ ALGORITMUS MENETE

Az algoritmus teljes menete az alábbiak szerint foglalható össze:

0a. lépés: Probléma meghatározása (terhelések, megfogások, térfogathányad).

0b. lépés: Véges-elemes modell legelső megoldása.

1. lépés: Elemek érzékenységeinek számítása (6) egyenlet alapján.

2. lépés: Hálófüggetlenségi szűrő alkalmazása. [3],[5], [7],[8]:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^K w(r_{ij}) \alpha_j^c}{\sum_{j=1}^K w(r_{ij})}, \quad (29)$$

ahol a súlyok

$$w(r_{ij}) = r_{\min} - r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (30)$$

ahol α_j^c a számított érzékenységi számok, α_i szűrt értékek, $w(r_{ij})$ a súlyok a szűrés során, r_{ij} az i . és j . cella távolsága, r_{\min} a szűrő sugara. A súlyozást csak az i . elem körüli, r_{\min} sugarú tartományban kell elvégezni.

3. lépés: Érzékenységi számok tompítása az előzmények alapján. [3]

$$\alpha_i^{\text{new}} = H_s \alpha_i^{\text{old}} + (1 - H_s) \alpha_i^c, \quad (31)$$

ahol H_s a stabilizációs szűrő értéke.

4. lépés: „threshold” paraméter meghatározása (pl. intervallumfelezési eljárással) – QSQF ciklus.

5. lépés: Új sűrűségek számítása – optimált változó értékeinek frissítése.

6. lépés: Sűrűség tompítási séma alkalmazása (vagy az össz-sűrűség növekedés korlátozásán alapuló AR_{\max} értékét felhasználó eljárás alkalmazása 4-5-6. lépés helyett).

7. lépés: Véges-elemes feladat megoldása ((3) egyenlet).

8. lépés: A térfogathányadra vonatkozó előírás fokozatos közelítése.

$$V^{k+1} = \max(V_{\min}, V^k (1 - ER/100)), \quad (32)$$

ahol $V_{\min} = f \cdot V_0$ az elérni kívánt térfogathányad, ER az evolúciós ráta.

9. lépés: Ha még nem értünk el konvergenciát, ugrás az 1. lépéshez.

10. lépés: Ha még nem értünk el konvergenciát, β növelése, majd ugrás az 1. lépéshez.

11. lépés: Végleges megoldás elérése. (28) alapján könnyen belátható, hogy az algoritmus határesetben a BESO-t adja vissza.

6. RÁCSOS TARTÓ TERVEZÉSE

Az alábbiakban bemutatásra kerül a korábbi eljárások – SIMP és BESO – eredményeinek összehasonlítása az új eljárás által szolgáltatott eredményekkel néhány klasszikus, rácsos tartó optimalizációs feladatán keresztül.

A véges-elem modell prekondicionált konjugált gradiens módszerrel került megoldásra minden esetben, az előírt reziduális hiba 10^{-6} - 10^{-10} között került meghatározásra feladattól függően. Az eredmények egy hajlított tartó (2/3D) mintáján keresztül (sikeresen) összehasonlításra is kerültek az ADINA R&D Inc. ADINA® nevű véges-elemes szoftverével is.

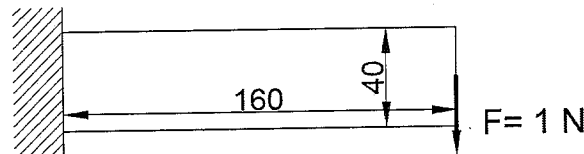
A megoldás keresése során – a biztos konvergencia érdekében – minden esetben 200 iteráció lett lefuttatva. A zárójelben szereplő érték pedig azt jelenti, hogy az

optimált változó mikor ért (és maradt végleg) a legutolsó eredmény $\pm 1\%$ -os környezetében.

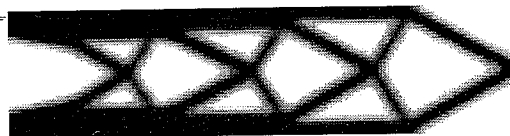
6.1 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó

Mivel a lineáris rugalmasságtan keretein belül – ahol dolgozunk – a kialakuló szerkezet független a Young-féle rugalmassági modulustól, ezért a szakirodalomban – a könnyű összehasonlíthatóság érdekében gyakran alkalmaznak kis szilárdságú, de kerek számokkal kifejezhető szilárdságú anyagokat és terheléseket. Ennek megfelelően itt is $E=1$ MPa, $\nu=0.3$ anyagú, 160 mm x 400 mm méretű, 160x40 véges-elem hálóval diszkrétizált hálót alkalmazunk, a terhelés pedig $F=-1$ N, az előírt térfogathányad pedig $V_0=0.5$, végül $x_{\min}=0.001$, $r_{\min}=3,0$ mm. A SIMP és soft-kill BESO esetén számított értékek megegyeznek [3]-ban szereplő értékekkel. A feladat, illetve az egyes eredmények a 3-4-5-6-7-8. ábrákon találhatóak meg. Érdemes megfigyelni, hogy – ha bár csak kis mértékben, 0,55%-kal – de az új optimalizációs eljárás egy esetben egy eltérő topológiájú, de alacsonyabb „compliance”-t képviselő megoldást adott vissza, ráadásul kisebb iterációszámmal, ami pozitív kilátásokat támaszt az algoritmus hasznosságát illetően.

Megjegyzés: A SIMP esetében az átmeneti sűrűségeket is tartalmazó megoldás miatt magasabb jelentősen az optimált érték.



3. ábra. 2D konzolos tartó problémája



4. ábra. SIMP megoldása (201,2 Nmm; 200(32))



5. ábra. BESO megoldása (181,4 Nmm; 200(33))



6. ábra. QSQF megoldása (181,3 Nmm; 200(31), pcw), $V_0=0,55$; $ER=1,5\%$; $H_s=0,5$; $H_d=0,5$ (it. < 30); $\beta=4,6,8...$



7. ábra. QSQF megoldása (182 Nmm; 200(52), pcw.)
 $V_0=0,55$; $ER=1,5\%$; $H_s=0,5$; $H_d=0,5$ (it.<30);
 $\beta=4,5,6...$

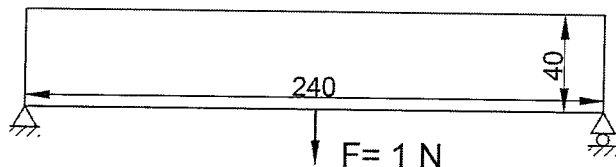


8. ábra. QSQF megoldása (184 Nmm; 200(52), inv.pow), $V_0=0,7$; $ER=1,5\%$; $H_s=0,5$; $H_d=0,4$ (it.<40);
 $\beta=4,5,6...$

6.2 Hídszerkezet optimalálása

Itt $E=200$ GPa, $\nu=0.3$ anyagú, 240 mm x 40 mm méretű, 240x40 véges-elem hálóval diszkretizált mezőt alkalmazunk, amin a terhelés $F= -100$ N, az előírt térfogathányad pedig $V_0=0,5$, végül $x_{\min}=0,001$, $r_{\min}=6,0$ mm. A soft-kill BESO esetén számított értékek nagyon közel állnak a [3]-ban szereplő értékekhez.

A feladat, illetve az egyes eredmények a 12-13-14. ábrákon találhatóak meg. Mivel az új algoritmus a BESO és SIMP eljárással megegyező topológiát eredményezett, így azok külön ábrával nem kerültek ismertetésre.



9. ábra. Hídszerkezet problémája



10. ábra. SIMP megoldása (2,551 Nmm; 200(30))
 $r_{\min}=3,0$ mm



11. ábra. BESO megoldása (2,365 Nmm; 200(37))

$ER=5\%$; $AR_{\max}=5\%$

QSQF megoldása (2,41 Nmm; 200(93), pcw.)

$V_0=0,7$; $ER=5\%$; $H_s=0,5$; $H_d=0,2$ (it.<30); $\beta=5,6...$

QSQF megoldása (2,38 Nmm; 200(79), inv.pow)
 $V_0=0,7$; $ER=5\%$; $H_s=0,5$; $H_d=0,4$ (it.<40); $\beta=3,5,7...$

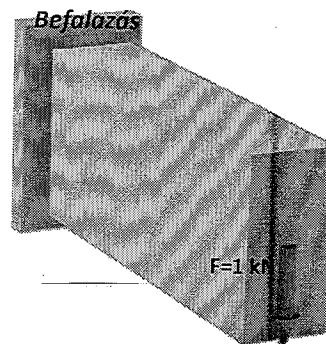
Érdemes megfigyelni, hogy az új eljárás a korábbiakhoz hasonló topológiát javasolt, de azoknál 1,19 ill. 0,6%-kal magasabb értékkel, és magas iterációszámokkal. Ennek ellenére ez nem az algoritmus hibájának tekinthető, mint inkább a megfelelő tapasztalat hiányának a paraméterek megválasztásánál (hiszen a határesetben az algoritmus a soft-kill BESO-t adja vissza).

6.3 3D konzolos tartó

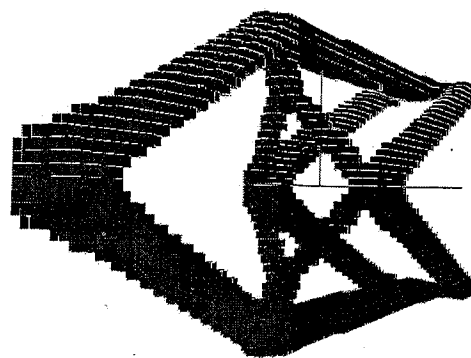
Ebben az esetben $E=10$ GPa, $\nu=0.3$ anyagú, 100 mm x 20 mm x 40 mm méretű, 100x20x40 véges-elem hálóval diszkretizált mezőt alkalmazunk, ahol a terhelés $F= -1000$ N, az előírt térfogathányad pedig $V_0=0,1$, végül $r_{\min}=3,0$ mm. Az előző két esettel ellentétben itt a megoldás gyorsítása érdekében $x_{\min}=0,0025$ érték került alkalmazásra.

A feladat, illetve az egyes eredmények a 12-13-14-15-16. ábrákon találhatóak meg.

Érdemes megfigyelni, hogy az új eljárás – a 2D-hez hasonlóan – itt is tudott alternatív, emellett 1,2%-kal jobb topológiát javasolni. Annak érdekében, hogy a BESO esetében is bemutatásra kerüljön az eredmények paraméterektől való függése, itt két különbözően paraméterezett, BESO eljárással nyert megoldás is bemutatásra került.

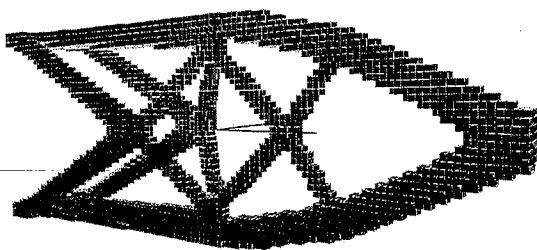


12. ábra. 3D konzolos tartó problémája

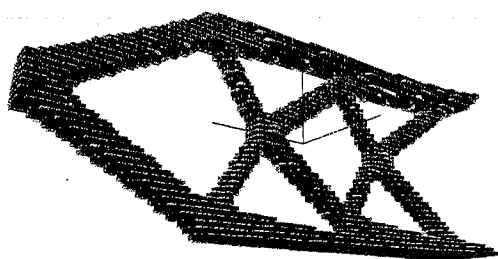


13. ábra. BESO megoldása (1272 Nmm; 200(90))
 $ER=2,5\%$; $AR_{\max}=10,0\%$

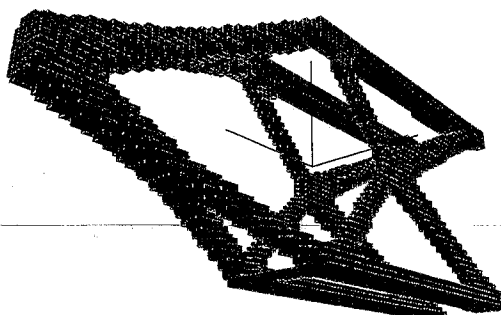
A BESO megoldása (ld. 13. ábra) topológiailag megegyezik, és méreteiben is hasonló volt a SIMP eredményeihez eredményéhez, bár az eltérő modell miatt utóbbi magas „compliance” értéket szolgáltatott (2089,6 Nmm; 200(160)).



14. ábra. BESO megoldása (1303 Nmm; 200(168))
 $ER=3,0\%$; $AR_{max}=50,0\%$



15. ábra. QSOF megoldása (1255 Nmm; 200(144);
 pcw.)
 $V_0=0,3$; $ER=3,0\%$; $\beta=4,5, \dots$; $H_s=0,5$, $H_d=0,5$ (it.<140)



16. ábra. QSOF megoldása (1417 Nmm; 200; inv. pow.)
 $ER=2,5\%$; $H_s=0,55$, $H_d=0,55$ (it.<60)

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra került eljárás – a bemutatott eredmények alapján – egy ígéretes, evolúciós alapon megvalósuló topológiai optimálási eljárás. Az új eljárás határesetben nem csak egy régi módszert ad vissza (BESO), de rendkívüli rugalmasságának hála nagy lehetőségek rejlenek benne. Bár még sok fejlesztés és tesztelés szükséges az algoritmus jobb megismeréséhez, de már a jelenlegi formájában is hatékonyan alkalmazható.

8. SUMMARY

The method in the current article is, according to the presented results, a promising evolutionary topology optimization method. The new method does not only include a previous, well-tested method (BESO), but due to its great flexibility hides big possibilities within as well. Although extensive testing and development is still required, but the algorithm can be already used in its current form.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alap OTKA T 75678 támogatásával.

10. IRODALOM

- [1] ZHOU, M., ROZVANY, G. I., N.: On the validity of ESO type methods in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 21, Number 1, 80-83, 2001.
- [2] QUERIN, O.M., STEVEN G.P., XIE, Y. M.: Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, Volume 15, Number 8, 1031-1048. 1998.
- [3] HUANG, X., XIE, Y. M.: *Evolutionary Topology Optimization of continuum Structures – Methods and Applications*. Wiley, 2010.
- [4] ZHOU, M., ROZVANY, G.I.N.: The COC algorithm, part II: Topological, geometry and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 89, Issues 1-3, 309-336, August 1991.
- [5] SIGMUND, O.: A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Volume 21, Number 2, 120-127. 2001
- [6] BENDSHOE, M. P., SIGMUND, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Springer, 1995.
- [7] SIGMUND, O., PETERSSON, J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh independencies, and local minima. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 16, Number 1, 68-75. 1998.
- [8] HUANG, X., XIE, Y.M.: Convergent and mesh independent solutions for bi-directional evolutionary structural optimization method. *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 43, Number 14, 1039-1049. 2007.